

一种基于模糊原理的碰撞危险度模型

刘宇宏 陈洪波 郝燕玲

(哈尔滨工程大学)

摘要 基于“领域”概念和模糊原理,建立起一个用于确定船舶间碰撞危险度的数学模型。该模型不仅综合考虑了多种因素对碰撞危险度的影响,而且简便易行。通过模拟试验表明:本模型能够很好地反映出实际情况,具有较好的效果。

关键词 碰撞;危险度;领域;模糊;避碰

A Risk Degree Model of Collision Based on Fuzzy Theory

Liu Yuhong Chen Hongbo Hao Yanling

(Harbin Engineering University)

Abstract Based on the *domain* concept and fuzzy theory, the authors have build a mathematical model that is used to determine the risk-degree of collision between ships. The model not only takes many factor's effect into consideration, but also is easy to operate. The model test indicates that it can reflect real situation perfectly and has a good result.

Key words collision; risk-degree; *domain*; fuzzy; collision avoidance

引言

船舶在各种会遇状态下,彼此间存在着一定的碰撞危险 (Risk of Collision)^[5],为了有效地衡量船舶间的碰撞危险,人们曾经提出了各种方法,而多年来普遍被人们采用的是 *DCPA*(会遇最近距离)和 *TCPA*(到达会遇点的时间)所描述的碰撞危险^[1,2]。如有的系统规定:“若 $DCPA \leq 0.5 \text{ n mile}$ 时,则有碰撞危险”,“若 $0.5 \text{ n mile} \leq DCPA \leq 2.0 \text{ n mile}$ 时,则为会遇距离不宽裕”,“若 $TCPA \leq 7.5 \text{ min}$ 时,则为时间紧迫”等等。日本的鹤田三郎在他的论述中就曾根据 *DCPA* *TCPA* 的不同取值,将危险度分为 5 级,见图 1。Kearon 和今津隼马、小山健夫等人还曾经综合考虑 *DCPA* *TCPA* 的影响,建立了如下的模型:

$$d = (a \cdot DCPA_i)^2 + (b \cdot TCPA_i)^2 \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

其中 a 和 b 为加权值,由统计数据得到, d 值越小,来船越危险。

如今,一种更为准确的方法是采用“领域”(Domain)^[12]这一概念。它是指每艘船舶周围为使该

船舶保持安全航行所需的有效水域。人们指出:若目标船进入本船的“领域”内,则认为两船间有碰撞危险,需要采取一定的避碰措施。Domain理论最早由 Fjli 于 1964 年提出,之后,又经由 Goodwin Davis B. A. Colley 及 T. G. Coldwell 等人的发展,使之在如何形成 Domain 的最佳形状及大小来充分体现出实际危险状况方面提出了各种见解和理论。而迄今为止,人们尚未就 Domain 的大小和形状达成一致的意見,因为:要形成一个有效的 Domain 需要考虑的因素实在太多了。它不仅要考虑到目标与本船的会遇态势,还要考虑到航海人员的心理因素(航海经历、个人能力等)、本船的物理因素(船的大小、类型等)以及当前的环境(天气状况、水道类型、通航密度等)^[5]。所以,尽管 Domain 理论已提出多年,但它在实际航海中并未得到很好的运用。

鉴于上述情况,采用 DCPA TCPA 的方法来衡量碰撞危险虽然简便易行,但由于其考虑的因素不够全面,所以并不能真正反映出实际危险情况;而且由于 DCPA TCPA 的量纲不同,在综合考虑它们时,若只对其进行数值上的运算,不管其量纲,这也是不可取的。Domain 理论虽然对各种因素进行了充分的考虑,但如何以数学模型的形式将其精确地描述出来,至今仍是一个难题。

1 模糊碰撞危险度模型

判断碰撞危险度是实际航海过程中不可缺少的一步,也是航海智能避碰专家系统中的重要组成部分。要开发一个实用的航海智能避碰专家系统,首先要解决的就是建立起碰撞危险度判断的数学模型,并使之能够达到:

- (1) 简便易行;
- (2) 反映船舶间的会遇类型(对遇、追越、交叉相遇等);
- (3) 考虑本船的操纵性能;
- (4) 考虑船舶间的会遇方向;
- (5) 反映当前能见度情况;
- (6) 反映当前水域情况。

1.1 模糊概念的引入^[7]

我们在研究碰撞危险的过程中发现,航海人员对来船所存在的碰撞危险并不仅仅用“是”、“否”两个字来描述。由于人的思维是一种模糊的逻辑思维,所以在判断来船,尤其是多船对本船造成的危险时,人们往往在头脑中能够形成诸如:哪一条船比较危险,哪一条船危险度更大一些,或哪一条船对本船不那么危险等一系列模糊的概念。另外,如前面提到的“会遇距离不宽裕”、“时间紧迫”等概念,在很大程度上也都是一种模糊的语言描述。这就启发了我们在建立碰撞危险度判断数学模型时,引入模糊概念和原理,从而也使我们所设计的航海智能避碰专家系统能够更好地接近专家的水平。

通常,我们称外延不分明的概念为模糊概念。为了用数学方法刻画这些概念,引入了不同于普通集合的另一类集合——模糊集合。模糊集合的概念是 L. A. Zadeh 于 1965 年首先提出的,其基本思想是把经典集合中的绝对隶属关系灵活化或称模糊化。从特征函数方面讲就是:元素 x 对集合 A 的隶属程度不再局限于取 0 或 1,而是可以取从 0 到 1 的任何一个数值,这一数值反映了元素 x 隶属于集合 A 的程度。

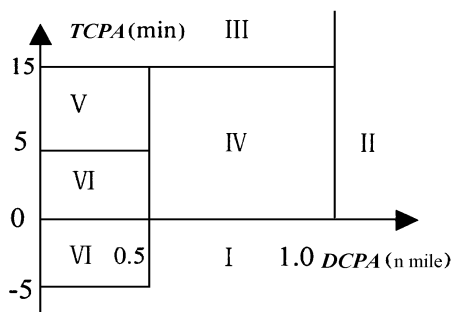


图 1 TCPA/DCPA 危险度分类

碰撞危险这一概念就是一个模糊概念。在现代航海中我们已不能再用是否存在碰撞危险 (0或1)来简单地描述当前局面了,我们需要更完善的数学模型来反映出这一局面对造成碰撞危险的隶属程度,即碰撞危险度。

1.2 隶属函数的确定

正如前面提到的,我们要求该数学模型能够充分反映出各种因素对碰撞危险度的影响,而在多种因素中,只有 $DCPA$ $TCPA$ 和 $Range$ (目标与本船的距离)是随它们取值的减少,危险度值增加;而其他因素,如:会遇类型、会遇方向及能见度等和危险度之间并不存在明显的线性关系。所以,我们以 $DCPA$ $TCPA$ 和 $Range$ 为主建立碰撞危险的隶属函数,而将其他因素融入这三个函数当中,最后的碰撞危险将由这三个隶属度值经算术运算得到。

目前国内外已提出各种确定隶属函数的方法^[3,4],如:示范法(1972年 Zadeh)、统计法(1976年 H. M. Hersh)、蕴含解析法(1976年 M. Kochen)等等。然而,无论采用哪一种方法,都要求所确定的隶属函数能够反映实际情况,并可通过专家评审的方法使之逐步修改而趋于完善。

这里我们采取模糊统计的方法^[3],它类似概率统计,根据实际情况,选定某些带参数的函数来表示碰撞危险这一模糊概念的隶属函数。与概率统计不同的是:模糊统计是通过随机集这一高层次的概率结构来实现的,它计算变动集 A 套住不动点 x 的频率,以求得 x 对 A 的隶属度,而不是计算变动点 x 落入不动集 A 的频率。这里的变动集 A 依赖某种概率规律而随机变化。

对于 $TCPA$ 及 $Ragne$,我们取 $a_1 = (a_1, a_2)$ 为 $(0, +\infty)$ 上的随机区间, a_1, a_2 是相互独立的连续型随机变量,则有 $U_{a_1} = F_1(x) \circ (1 - F_2(x))$, 其中: $F_1(x)$ 为 a_1 在 $(0, +\infty)$ 上的分布函数,当 $a_1 = 0$ 时有 $F_1(x) = 1$; $F_2(x)$ 为 a_2 在 $(0, +\infty)$ 上的分布函数,令 a_2 在 (a_1, a_2) 上服从均匀分布,其概率密

度为: $f(x) = \begin{cases} \frac{1}{a_2 - a_1} & a_1 < x < a_2 \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$, 则 a_2 的分布函数为 $F_2(x) = \begin{cases} 0 & 0 < x \leq a_1 \\ \frac{x - a_1}{a_2 - a_1} & a_1 < x \leq a_2 \\ 1 & x > a_2 \end{cases}$, 从而得其隶属

函数为: $_{-}(i) = \begin{cases} 1 & 0 < i \leq a_1 \\ \frac{a_2 - i}{a_2 - a_1} & a_1 < i \leq a_2 \\ 0 & a_2 < i \end{cases}$ 同理我们可以求出 $DCPA$ 的隶属函数为:

$$_{-}(i) = \begin{cases} 1 & 0 < i \leq a \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{b - a} \left(i - \frac{a + b}{2} \right) & a < i \leq b \\ 0 & b < i \end{cases}$$

这两种函数都是适用于 x 取值较小时的隶属函数,它们不仅能够很好地描述 $DCPA$ $TCPA$ 和 $Range$ 与危险度之间的线性关系,而且简单,容易理解,计算机容易模拟实现。我们根据实际情况来确定其中各个参数 a, b 及 a_1, a_2 , 并采用综合加权法复合出最后的危险度隶属函数。

我们把 $DCPA$ $TCPA$ 和 $Range$ 的变化域分别记为^[2]: U_D U_T 和 U_R , 对同一模糊概念“碰撞危险度”各自用一模糊集来表示,记为: A_D A_T 和 A_R , 其隶属函数如下:

$$U_{A_D}(DCPA) = \begin{cases} 1 & DCPA \leq d_1 \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \left[\frac{\pi}{d_2 - d_1} \left(DCPA - \frac{d_1 + d_2}{2} \right) \right] & d < DCPA \leq d_2 \\ 0 & d_2 < DCPA \end{cases}$$

$$U_{A_T}(TCPA) = \begin{cases} 1 & TCPA \leq t_1 \\ \frac{t_2 - TCPA}{t_2 - t_1} & t_1 < TCPA \leq t_2 \\ 0 & t_2 < TCPA \end{cases}$$

$$U_{A_R}(Range) = \begin{cases} 1 & Range \leq r_1 \\ \frac{r_2 - Range}{r_2 - r_1} & r_1 < Range \leq r_2 \\ 0 & r_2 < Range \end{cases}$$

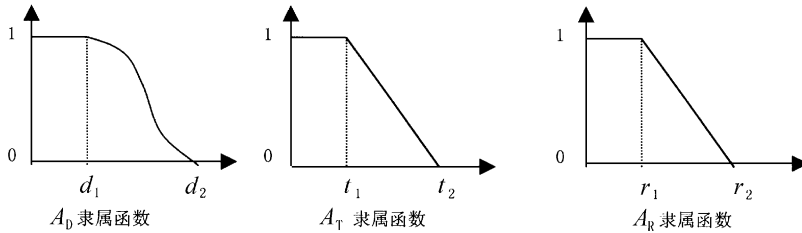


图 2 隶属函数

1.3 模型的进一步解释

这里我们取 $d_1 = (K_1^\circ \cdot DLA + T^\circ \cdot V_R^\circ \cdot F_1)^\circ \cdot F_2^\circ \cdot F_3 = Domain$ 其中:

DLA : 最晚采取避碰行动时两船间的距离。若小于该距离采取避碰行动,即使幸免碰撞,也会形成紧迫局面。

K_1 : 若会遇类型为对遇、追越或右舷交叉,则 $K_1 = 1.0$; 若为被追越或左舷交叉,则 $K_1 = 0.8$ 。《1972 年国际海上避碰规则》(简称《规则》)中规定:在两船呈对遇、右舷交叉或追越态势下,本船为让路船,应及早采取避让行动,故其周围的安全水域也较大,以便做到对来船的早发现、早预警、早避让;而对左舷交叉及本船追越它船的态势,本船为直航船,它船为让路船,故本船周围安全水域的范围也相对小一些, $K_1 \cdot DLA$ 正反映了这一思想,也反映了会遇态势对碰撞危险的影响。

T : 本船转向 90° 所需的时间。

V_R : 目标船的相对速度。

F_1 : 由会遇状态确定

$$F_1 = \begin{cases} \frac{360^\circ - DE}{360^\circ} & DE \leq 180^\circ \\ \frac{DE}{360^\circ} & DE > 180^\circ \end{cases}$$

$$\text{其中: } DE = \begin{cases} \text{目标当前方位} & DCPA \leq 0.5 \text{ n mile} \\ \text{目标 CPA 点的方位} & DCPA > 0.5 \text{ n mile} \end{cases}$$

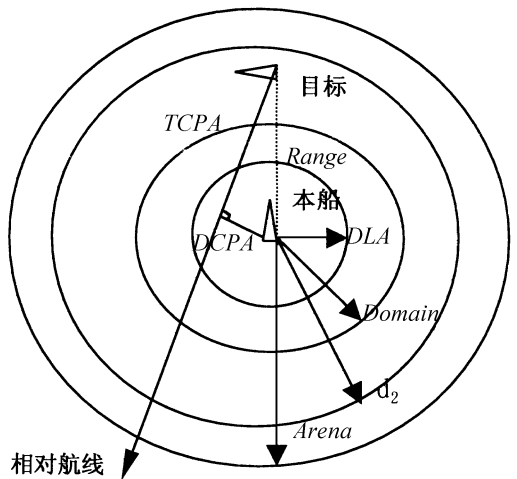


图 3 本船周围的水域分布

$T^\circ \cdot V_R^\circ \cdot F_1$ 反映了本船的操纵性能及不同方向来船对危险度的影响。在实际航行中,往往要

求两船相遇(到达 CPA 点)的时间要大于本船采取一定措施(如:转向或减速)所需的时间,体现在距离上则要求:采取避让措施时两船间距离 $\gg R^\circ$ V_R F_1 为反映两船会遇方向或目标方位的因子,它来自于航海人员的实践经验。人们普遍认为:两舷来船要比船尾来船更危险;而船首来船又比两舷来船更危险。

$$F_2 = \begin{cases} 1.0 & \text{良好} \\ 1.25 & \text{不良} \end{cases}$$

$$F_3 = \begin{cases} 1.0 & \text{一般水域} \\ 0.75 & \text{复杂水域} \end{cases}$$

当能见度不良时,扩大 $Domain$ 值,以增大预警范围。在复杂水域如:沿岸航行时,由于航行水域受限,故 $Domain$ 值也应减少。

$d_2 = K_2^\circ d_1$ 其中 K_2 为系数,由船舶状态的不稳定性及两船行动的不协调及雷达设备的误差等因素来确定。

$$t_1 = \begin{cases} \frac{DLA^2 - DCPA^2}{V_R} & DCPA \leq DLA \\ \frac{DLA - DCPA}{V_R} & DCPA > DLA \end{cases}$$

$$t_2 = \frac{Arena^2 - DCPA^2}{V_R} \quad \text{其中: } Arena = V_R \cdot \left(T + \frac{d_2}{V_R} \right) = d_2 + V_R \cdot T$$

$$r_1 = DLA, r_2 = Arena$$

这里, d_1, d_2 构成了一个环形区域,对于 $DCPA < d_1$ 的来船,我们认为其对本船构成了碰撞危险,本船需采取一定的避让措施;对于 $DCPA > d_2$ 的来船,我们认为它对本船尚无任何碰撞危险;而对于 $DCPA$ 介于 d_1, d_2 之间的来船,我们认为它对本船构成了一定的碰撞危险,其危险程度即为其隶属函数的隶属度。同样, t_1, t_2 及 r_1, r_2 也反映了类似的思想,只不过它们分别用时间、距离对碰撞危险进行了衡量。

取论域 $U = U_D \times U_T \times U_R$, 在论域 U 上“碰撞危险性”可表示为模糊集 A , 则 $A = A_D \times A_T \times A_R$ 即:

$$U_A(DCPA, TCPA, Range) = a_D \cdot U_{A_D}(DCPA) + a_T \cdot U_{A_T}(TCPA) + a_R \cdot U_{A_R}(Range)$$

其中: a_D, a_T 和 a_R 分别为 $DCPA, TCPA$ 及 $Range$ 对碰撞危险度的影响权重;

这里 DLA, T, K_1, K_2 及 a_D, a_T, a_R 的取值将根据当前航行情况及一些经验数据来确定。

2 仿真试验结果

对上面提到的模糊避碰危险度判断模型,我们通过计算机进行了仿真试验,根据测得的数据证明该方案具有较好的实际效果。

2.1 对各方位来船的危险度的测定

这里我们假设本船的航向为 0° , 航速为 10 kn , $DLA = 1 \text{ n mile}$, $K_2 = 2$, 能见度取良好, 水域情况取一般, $a_D = a_T = a_R = \frac{1}{3}$ 目标船的航速为 15 kn , 两船间的距离 $Range = 4 \text{ n mile}$ 则通过模拟不同方位、来船的航向, 我们测得了一些数据: (方位、航向单位为 $^\circ$, $Domain$ 单位为 n mile)

表 1 仿真试验测定结果

方位	航 向	会遇状态	$Domain$	U_{Δ_D}	U_{Δ_T}	U_{Δ_R}	U_{Δ}
0	180	对遇	3. 94	1	0. 680 25	0. 690 25	0. 786 834
5	185	对遇	3. 897 677	1	0. 676 695	0. 677 171	0. 784 625
10	190	右舷交叉	3. 849 032	1	0. 671 544	0. 673 520	0. 781 688
15	195	右舷交叉	3. 795 482	1	0. 664 651	0. 669 255	0. 777 969
⋮							
115	295	被追越	1. 697 509	0. 473 472	0. 176 459	0. 211 130	0. 287 020
120	300	被追越	1. 625 256	0. 328 856	0. 135 202	0. 160 460	0. 208 173
125	305	被追越	1. 553 635	0. 199 252	0. 067 524	0. 102 846	0. 129 874
⋮							
275	95	左舷交叉	1. 930 138	0. 974 686	0. 300 283	0. 366 309	0. 547 093
280	100	左舷交叉	1. 989 265	0. 999 038	0. 320 849	0. 390 296	0. 570 061
285	105	左舷交叉	2. 047 300	1	0. 340 041	0. 411 903	0. 583 981
⋮							

根据上述表中的数据,我们可以画出 $Domain$ 的形状,从而得到:对于对遇及右舷交叉的来船,按照《规则》规定本船应为让路船,故其 $Domain$ 值较大,在来船的距离、航速相同的情况下,对本船造成的威胁也比较大;而对于追越及左舷交叉的来船,本船为直航船,故其 $Domain$ 值相对较小,它们对本船造成的威胁也较小,这种判断是符合实际航海情况的。

2.2 不同距离来船的危险度判断

在来船方位、航向及航速一定的情况下,通过模拟不同距离上的来船,测得其危险度,得到如下曲线:(见图 5)

可见,随着来船向本船的不断逼近,危险度不断增大。

2.3 不同航速来船的危险度判断

在来船方位、航向及距离一定的情况下,通过模拟不同航速的来船,测得其危险度,得到如下曲线:(见图 6)

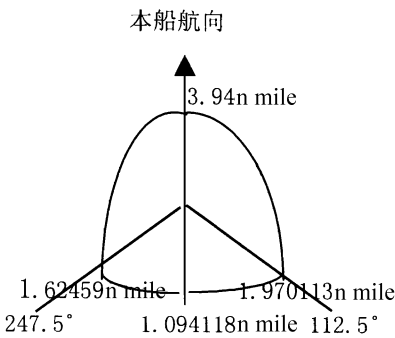


图 4 本例的 $Domain$

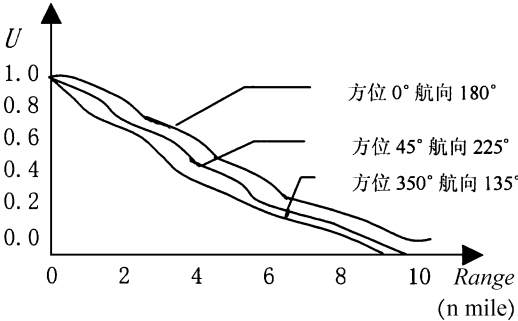


图 5 不同距离来船的危险度

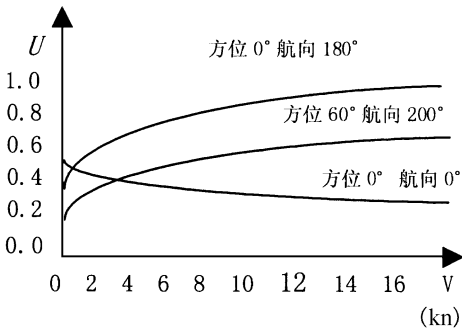


图 6 不同航速来船的危险度

可见,对于对遇、交叉相遇及被它船追越的情况,随着来船航速的不断增大,危险度也不断增大。而对于本船追越它船的情况,则随来船航速的不断增大,危险度减小,这也与实际判断相符。

总之,通过仿真试验及其数据的分析,我们可以得出:

- (1) 本模型不仅综合考虑了各种因素对碰撞危险度的影响,而且简便易行;
- (2) 本模型得出的碰撞危险度,基本上与实际情况相符。

根据本模型得出的碰撞危险度,我们可以进一步产生避碰方案,同时它对多目标避碰方案的形成也有着十分重要的意义,这将是我们的航海智能避碰专家系统^[6,8]的另一部分工作。

参 考 文 献

- 1 邱志雄,兰培真.船舶避碰综合决策系统.大连海运学院学报.1992,18(3): 247~ 253
- 2 翁跃宗.船舶避碰领域的知识与专家系统.中国航海.1994,35(2): 45~ 50
- 3 水本雅晴(日).模糊数学及应用.北京:科学出版社,1988
- 4 刘有才,刘增良.模糊专家系统原理与设计.北京:北京航空航天大学出版社,1995
- 5 甄得福,罗世民,杨秋平.船舶操纵与避碰.北京:人民交通出版社,1992
- 6 Martha Grabowski, William A. Wallace, An Expert System for Maritime Plots Its Design and Assessment Using Gaming, MAN AGEMENT SCIENCE, 1993, 39(12): 1506~ 1520
- 7 Zhao J, Tan M, Price W G. and Wilson P A. DCPA SIMULATION MODEL FOR AUTOMATIC COLLISION AVOIDANCE DECISION MAKING SYSTEMS USING FUZZY SETS, 0-7803-2056-5 IEEE, 1994 244 ~ 249
- 8 MARTHA GRABOWSKI, The Piloting Expert System: Transition from Off-Line Prototype to On-Line Decision Support, NAVIGATION: Journal of The Institute of Navigation, 1990, 37(1): 1~ 15

中、日航海学术交流会在汉召开

中、日两国航海学会学术交流会于9月22~23日在我国武汉交通科技大学召开。这是自1984年开始,根据双方关于每三年举办一次学术交流会的协议举办的,今年是第六次,此次主题为航行安全和防止船舶污染。日本21位教授和学者、我国29位专家和教授参加了交流,双方各发表论文11篇,范围涉及航行、稳性、通信、气象、船员因素、PSC检查以及溢油风险预测、生活污水处理、船机氮氧化物控制和重力分离数模等诸多领域。多数论文均具有新意和较高水平,学术气氛浓郁,交流讨论十分活跃。在此次交流会上,日方的论文偏重于实践和数据,中方则侧重于理论和综述,因为中方的与会代表多数为年轻学者和专家,均具有较高的学历和外语水平。交流会对中方青年学者的促进和激励颇大。9月24日,会议安排日方代表参观了武汉交通科技大学,日方对该校的设施,尤其具有船池设备、且可作浅水试验感到惊讶,从而为该校日后与日方建立校际联系奠定了一定的基础。

交流会产生了很大反响,取得了预定的效果。双方决定,下次交流会将于三年后在东京召开,双方还决定努力加大合作力度和增加人员交往。

交流会得到了协办单位——武汉交通科技大学的高度重视和积极支持。